

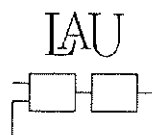
# XII Congresso Brasileiro de Automática

Data: 14 a 18 de setembro de 1998 - Uberlândia /MG

APOIO:



PROMOÇÃO:



# ALGORITMOS GENÉTICOS ASSOCIADOS A CADEIAS DE GRAFOS PARA RESTABELECIMENTO DE ENERGIA ÓTIMO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS

103440  
A. C. B. DELBEM      N. G. BRETAS - MEMBRO SENIOR DO IEEE

*Laboratório de Análise Computacional - LACO. Departamento de Eng. Elétrica.  
Escola de Engenharia de São Carlos - EESC. Universidade de São Paulo - USP.  
Rua Dr. Carlos Botelho, 1465, 13560-250 São Carlos, SP, BRAZIL  
Email: ngbretas@sel.eesc.sc.usp.br*

A. DE CARVALHO ✓

*Instituto de Ciências Matemáticas de São Carlos - ICMSC Universidade de São Paulo - USP.  
Email: andre@icmsc.sc.usp.br*

**Resumo**— Diversos métodos tem sido desenvolvido para restabelecer energia para uma área desenergizada em sistemas de distribuição, depois de uma falta na rede ter sido identificada e isolada. Porém, esses métodos realizam só o restabelecimento para circuitos com características específicas; além disso, eles não são capazes de lidar com áreas desenergizadas grandes. Este artigo desenvolve um método que usa Algoritmos Genéticos (GA) para restabelecimento de energia. O algoritmo supera a característica combinatorial intrínseca e trabalha com função objetivo não linear e não contínua inerentes neste tipo de problema. Uma nova representação dos sistemas de distribuição também é proposta. É mostrada a eficiência do método proposto usando um sistema de distribuição relativamente complexo.

**Abstract**— Several approaches have been developed to restore energy for an outage zone in distribution systems, after a fault in the network has been identified and isolated. To achieve the energy restoration, those approaches perform the restoration only for circuits with specific features; additionally, they are not able to deal with large outage zones. This paper develops a method using Genetic Algorithms (GA) for energy restoration. That algorithm overcomes the combinatorial characteristic and copes with non-linear and non-continuous objective function inherent to this kind of problem. A new representation for distribution systems is also proposed. The efficiency of the proposed approach is shown using a fairly complex distribution system.

**Key Words**— Graph Chains, Genetic Algorithms, Energy Restoration, Distribution Systems.

## 1 Introdução

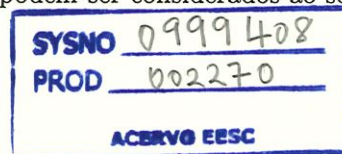
O restabelecimento de energia em sistemas de distribuição tem despertado crescente interesse nos últimos anos, principalmente devido ao grande aumento da velocidade de processamento dos computadores atuais. Um plano de restabelecimento de energia elaborado e rápido é necessário para lidar com faltas permanentes em sistemas de distribuição. Ou seja, depois do local de uma falta ter sido identificado e a zona de falta ter sido isolada pelos reles, é de interesse dos operadores encontrar um plano apropriado para restabelecer a energia na área desenergizada. Por outro lado, durante a operação normal do sistema, muitas vezes é necessário isolar zonas para execução de trabalhos normais de manutenção na rede. Nestes dois casos o objetivo é praticamente o mesmo: encontrar um plano de reenergização de forma a deixar a menor área do sistema fora de serviço. Para tal, os operadores tendem a utilizar suas experiências anteriores para que o planejamento satisfaça um série de necessidades práticas e objetivas. Dentre elas poderia-se destacar: um número reduzido de operações de chaveamento, um pequeno número de consumidores sem energia (ou

nenhum) e ausência de elementos sobrecarregados. Portanto, o restabelecimento do serviço aos consumidores é um problema com múltiplos objetivos, alguns deles conflitantes.

Outros objetivos podem ser considerados de acordo com as necessidades de cada companhia de energia. Por exemplo, manter a carga balanceada entre os alimentadores, limitar níveis de queda-de-tensão, evitar planos que necessitem de manobras realizadas em pontos muito longe um do outro (de forma a manter a topologia original da rede) e minimizar as perdas no sistema.

Os objetivos anteriores podem ser divididos em dois tipos básicos: os de transição de estado voluntária, na qual se quer uma melhor configuração para o sistema, minimizar perdas, etc. (o que é chamado de Planejamento Ótimo da Alimentação de Sistemas de Distribuição (Hsu e Kuo, 1994; Aoki et al., 1989); e a transição de estado involuntária, causada por faltas ou manobras para manutenção da rede (que caracteriza o problema de Restabelecimento de Energia). Claramente, os objetivos desses dois tipos de transição podem ser desejáveis em um único plano de restabelecimento de energia. Desta forma, esses e outros critérios podem ser considerados ao se definir

0999408  
tcmc

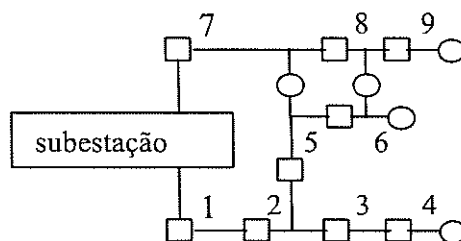


Este trabalho busca resolver essas questões que limitam o desempenho dos procedimentos já existentes. Utiliza-se para isso um algoritmo que é capaz de lidar com sistemas grandes e complexos como os encontrados em países em desenvolvimento. Além disso, é mostrado um procedimento capaz de alcançar o Restabelecimento Ótimo de Energia. A seção 2 apresenta outros métodos disponíveis para superar a característica combinatorial do restabelecimento de energia. A seção 3 discute os métodos existentes que usam técnicas de busca para restabelecimento de energia ótimo. Seção 4 sugere um método baseado em Algoritmos Genético (AG) para obter o restabelecimento de energia, bem como apresenta argumentos para explicar sua aplicação. Para resolver problemas inerentes de AG aplicados a restabelecimento de energia, o uso de cadeias de grafo é proposto na seção 5. Resultados experimentais são ilustrados na seção 6. Finalmente algumas considerações sobre o método são apresentadas na seção 7.

As configurações dos sistemas de distribuição são normalmente representadas por um conjunto de estados de chaves. Essas configurações podem ser descritas por um vetor

onde xi indica se a chave está aberta ( $x_i = 0$ ) ou fechada ( $x_i = 1$ ). As propostas desenvolvidos por Hsu e Kuo (1994), Morelato e Monticelli (1989) e Castro et al. (1980) podem precisar gerar  $2^n$  combinações para achar uma possível configuração que forneça energia para a área desenergizada; isso pode implicar em um tempo de processamento muito grande, principalmente se o sistema de distribuição em consideração tiver uma dimensão grande. Como resultado, tais métodos não são práticos, até mesmo para sistemas de distribuição pequenos.

Para evitar esse problema, alguns métodos usam algoritmos de transferência de carga. Tais métodos verificam elementos sobrecarregados e permitem que alimentadores longe do área desenergizada forneçam mais energia, reduzindo as cargas nos alimentadores mais próximos à área desenergizada. Porém, no caso de áreas desenergizadas muito grandes ou para sistemas de distribuição que operam próximo da capacidade de limite, tais métodos podem precisar de um tempo de processamento longo ou podem não atingir uma solução satisfatória.



Foi proposto em (Delbem et al., 1997a; Delbem, 1998; Delbem et al., 1998) um algoritmo de busca que não usa o espaço dos estados das chaves, e sim o espaço dos estados dos setores. Setores são trechos da rede entre chaves, veja Figura 1, onde quadrados são chaves fechadas, círculos são chaves abertas e números representam setores. Por exemplo, o número 7 indica o setor 7 que corresponde a um trecho de alimentador (constituído pelos setores 7, 8 e 9) delimitado por duas chaves fechadas (as quais o interliga ao setor 8 e à subestação) e uma chave aberta (que permite conectá-lo ao setor 5 do alimentador vizinho (o qual é constituído pelos setores 1, 2, 3, 4, 5 e 6)). Como o espaço dos estados dos setores é menor que o espaço dos estados das chaves (Delbem et al., 1997a), o tempo de processamento é reduzido. Além disso, essa técnica de busca usa heurísticas *fuzzy*, as quais produzem informações equivalentes a uma busca backward (Le, 1984) (de uma subestação para área desenergizada). As in-



ferências que usam heurísticas *fuzzy* podem ser pré-calculadas, reduzindo o tempo de processamento requerido em grande parte pela própria busca.

### 3 Buscando o Restabelecimento de Energia Ótimo

Liu et al. (1988) propôs uma metodologia na qual a redução de perdas na reconfiguração nova do sistema é feita juntamente com o plano de restabelecimento de energia. Devi et al. (1995) usou Fluxo de carga DC para otimizar a capacidade dos equipamentos. Wang et al. (1996) usou programação não linear inteira restringida por um fluxo de carga bem como fórmulas de redução de perdas. Hsu e Kuo (1994) usou raciocínio *fuzzy* para reduzir o número de operações de chaves e sobrecarga de alimentadores. Não obstante, todas essas propostas ou geram vetores  $X$  factíveis baseados em características locais do sistema e características da área desenergizada ou precisam gerar todos os vetores  $X$  (todo o espaço dos estados). Como a geração de todos os vetores  $X$  não é prática, a primeira alternativa tem sido a única maneira de se atingir um restabelecimento de energia ótimo.

Vale à pena lembrar que o procedimento para gerar vetores  $X$  factíveis através daquelas heurísticas é uma busca hill-climbing que pode localmente otimizar o plano de restabelecimento de energia, mas não pode garantir a solução ótima (Winston, 1993). Além disso, a função objetivo para problemas de reconfiguração é uma função não linear e não contínua. Por conseguinte, parte dos vetores  $X$  factíveis não podem ser gerados pelos algoritmos baseados em heurísticas.

Nesta pesquisa, um método de AG para gerar novas configurações do sistema não dependentes de características locais é proposto. Este método é capaz de lidar com a função de objetivo não linear e não contínua inerente à reconfiguração de sistemas de distribuição. Usando esta proposta de algoritmo genético, um plano de restabelecimento de energia ótimo é quase sempre obtido.

### 4 Algoritmos Genéticos

Os Algoritmos Genéticos são algoritmos de busca baseado em mecanismos de seleção natural e genéticos (Goldberg, 1989). Eles são conhecidos como sendo uma busca e uma técnica de otimização muito robusta (têm desempenho bom para uma variedade de aplicações). Assim, eles podem ser usados tanto problemas que requerem árvore de busca e problemas que usam técnicas de otimização em geral. Como resultado, AG são uma ferramenta poderosa para lidar simultaneamente com restabelecimento de energia e

otimização, isto é restabelecimento de energia ótimo em sistemas de distribuição.

Os conceitos básicos dessa técnica são: i) cada estrutura (criatura artificial) representa uma possível solução para o problema (em nosso caso, uma possível solução para o sistema de distribuição); ii) as estruturas são um pacote de strings (cromossomos) cujos bits (genes) alocam valores de característica (aleles) do indivíduo. Estruturas novas são geradas por mecanismos de troca que usa os pedaços daquelas strings mais aptos (ou adaptados): crossover. Tal processo é chamado reprodução. As estruturas de mais aptas são selecionadas de acordo com o valor de função objetivo delas. A cada repetição do processo é obtida uma geração nova. Depois de várias gerações ou depois que a estrutura mais apta tiver um valor desejado para função objetiva, o AG pára.

Para o problema de restabelecimento de energia, cada estrutura foi considerada como uma configuração do sistema que alimenta todos seus setores (configuração factível). Uma estrutura nova é uma possível mudança feita em uma estrutura da geração anterior. Genes são setores (Delbem et al., 1997b) e cromossomos são alimentadores. Uma estrutura nova (filha) só é gerada trocando setores vizinhos (genes) entre alimentadores (strings) da mesma estrutura (mãe), como uma forma de evitar genes inativos (setores não energizados).

Como é mostrado em (Delbem et al., 1997b), os Algoritmos Genéticos podem garantir um restabelecimento de energia ótimo. Porém, para sistemas grandes, o algoritmo é lento e a exigência de memória de RAM é muito grande. Para superar estas barreiras, uma forma nova de representar a configuração do sistema no computador é proposta neste artigo.

### 5 Representação de Sistema de Distribuição através de Cadeias de Grafo

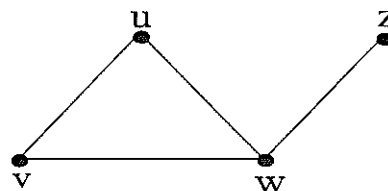


Figura 2. Exemplo de um Grafo.

#### 5.1 Teoria de Grafos relacionada à Representação de Sistemas de Distribuição

Esta seção começa definindo um grafo simples  $G$  [16] um par  $(N(G), E(G))$ , onde  $N(G)$  é um

conjunto finito de elementos não-vazios chamados de nós e  $E(G)$  é um conjunto finito de pares de elementos não ordenados distintos de  $N(G)$  chamados de arcos;  $N(G)$  é às vezes chamado de conjunto dos nós de  $G$ . Para ilustrar, a Fig. 2 representa um grafo simples  $G$  cujo conjunto de nós  $N(G)$  é o conjunto  $(u, v, w, z)$ , e cujo conjunto de arcos  $E(G)$  consiste nos pares  $(u, v)$ ,  $(v, w)$ ,  $(u, w)$  e  $(w, z)$ . Dado um par  $(x, y)$  é dito que une os nós  $x$  e  $y$ . Dado qualquer grafo  $G$ , uma seqüência de arcos em  $G$  é uma seqüência finita de arcos da forma  $(v_0, v_1), (v_1, v_2), \dots, (v_{m-1}, v_m)$  (também denotado por  $v_0 \rightarrow v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow \dots \rightarrow v_{m-1} \rightarrow v_m$ ). Uma seqüência de arcos na qual todas os arcos são distintos é chamada um caminho; se, além disso, os nós  $v_0, v_1, v_2, v_m$  são distintos (exceto, possivelmente,  $v_0 = v_m$ ), então o caminho é chamado de cadeia. Um caminho ou cadeia são fechados se  $v_0 = v_m$ . Um grafo é dito ser conexo se, dado um par de nós  $(x, y)$  de  $G$ , há uma cadeia de  $x$  para  $y$ . Um grafo arbitrário pode ser dividido em sub-grafos conexos disjuntos chamados componentes conexos. (Um grafo conexo tem só um componente; um grafo com mais de um componente é chamado um grafo desconexo).

**Teorema 1** *Deixe  $G_1$  e  $G_2$  serem dois grafos desconexos um do outro e sem cadeias fechadas. Adicionando um arco que os conecta resultará um grafo conexo sem cadeias fechadas.*

**Prova** Suponha que o arco  $v_i \rightarrow w_j$  conecta os grafos  $G_1$  e  $G_2$ . Como  $v_i \rightarrow N(G_1)$  e  $G_1$  é um grafo conexo, há uma cadeia de qualquer outro nó de  $G_1$  a  $v_i$ . Devido ao arco  $v_i \rightarrow w_j$ , há uma cadeia de qualquer nó de  $G_1$  a  $w_j$ . Como  $w_j \rightarrow N(G_2)$  e  $G_2$  é um grafo conexo, há uma cadeia de qualquer nó de  $G_2$  a  $w_j$ . Por conseguinte, há uma cadeia de qualquer nó de  $G_1$  a qualquer nó de  $G_2$  e vice-versa (assim os grafos  $G_1$  e  $G_2$  têm somente uma conexão entre eles). Se há mais do que uma cadeia de qualquer nó de  $G_1$  a qualquer nó de  $G_2$ , então há uma cadeia fechada que conecta aqueles nós. Portanto, há mais de uma conexão entre  $G_1$  e  $G_2$ , o que é uma contradição à hipótese que  $G_1$  e  $G_2$  têm somente uma conexão entre eles. Assim, o grafo conexo resultante é formado por somente por cadeias não-fechadas.

**Corolário 1** *Se um arco é removido de um grafo conexo sem cadeias fechadas, resultará em dois grafos conexos sem cadeias fechadas.*

### 5.2 Equivalence entre Grafos Desconexos sem Cadeias Fechadas e a Representação de Sistema de Distribuição

Um grafo de um sistema de distribuição pode ser obtido considerando suas chaves como os arcos do grafo e os trechos do sistema de dis-

tribuição entre chaves como os nós do grafo (setores (Delbem et al., 1998)). O grafo de um sistema distribuição é um grafo desconexo. Os alimentadores são os componentes do grafo de um sistema de distribuição. Cada alimentador é composto por cadeias não-fechadas. Por exemplo, a matriz de cadeias de grafo do sistema da Figura 1 é mostrada na Figura 3 (onde as linhas representam cadeias de grafo; os setores 1 e 7 estão conectados diretamente na subestação, assim os respectivos alimentadores são chamados de alimentador 1 e alimentador 7).

N. Cadeia	Cadeia
1	1 2 3 4
2	1 2 5 6
3	7 8 9

Figura 3. Representação por cadeias de grafo do sistema de distribuição na Figura 1.

Uma mudança na configuração de sistema feita pelo procedimento desenvolvido tem dois passos: i) abra uma chave conectada ao sectori no feederf; ii) feche uma chave conectada o sectori no feederf. A operação i) é semelhante à descrita no **Corolário 1** e a operação ii) é semelhante à operação mostrada no **Teorema 1**. Em outras palavras, dado um grafo desconexo formado por componentes sem cadeias fechadas, após mudanças como as descritas no **Corolário 1** e **Teorema 1**, mantém-se um grafo desconexo formado por componentes sem cadeias fechadas, isto é o universo de grafos desconexos sem cadeias fechadas é preservado.

Portanto, toda vez que o procedimento muda a configuração do sistema, ambos os teoremas são respeitados. Assim, após uma mudança em uma configuração factível com  $n$  alimentadores sem cadeias fechadas, a configuração nova do sistema é mantida com  $n$  alimentadores sem cadeias fechadas, isto é, a configuração nova do sistema também é factível.

### 5.3 O Poder da Representação por Cadeias de Grafo

A representação dos grafos em computadores normalmente é feita por uma matriz de incidência (Wilson, 1972). Isso requer pelo menos  $n^2$  bytes para representar uma configuração do sistema com  $n$  nós, isto é, o espaço de memória alocado é uma função quadrática de  $n$ . Até mesmo para sistemas de distribuição não-grandes, a memória alocada se torna um ponto crucial, pois milhares dessas matrizes (indivíduos) são criadas pelo Algoritmo Genético. Por outro lado, a representação através de cadeias de grafo (matriz de cadeias) requer cerca de  $n$  bytes (veja Figura 4), desta forma o espaço de memória alocado é uma função linear de  $n$ .

N. da Cadeia	Cadeia
1	1 2 3 4 5 6 7
2	8 9 10 11
3	12 13 14 15 16 17 18
4	19 20 21 22 23
5	24 25 26 27 28 29 30
6	24 25 26 27 28 29 31 32
7	33 34 35
8	36 37
9	38 39 40 41
10	38 39 40 42 43 44
11	38 39 40 42 43 45 47
12	38 39 40 42 43 45 46 48
13	49 50 51 52 53 54 55 56
14	57 58 59 60 61
15	62 63 64 65
16	66 67 68 69 70
17	71 72 73
18	71 72 74
19	75 76 77 78 79 80 81
20	82 83 84 85 86 87 88
21	89 90 91 92
22	89 90 91 93 94 95
23	89 90 91 93 94 96 97 98 99
24	100* 101 102 103 104 105
25	100* 101 102 106 107 108 109
26	110 111 112 113
27	110 111 112 114
28	115 116 117 118 119
29	115 116 117 118 120
30	115 116 117 125 124 122 123
31	115 116 117 125 126
32	127 128 129 130 131 132 133
33	127 128 129 130 134 135 136
34	137 138 139 140
35	141 142

Figura 4. Representação por cadeias de grafo do sistema de distribuição usado.

Outra vantagem importante da representação por cadeias de grafo refere-se ao tempo gasto para gerar uma configuração nova. Quando uma mudança na configuração do sistema acontece, é necessário verificar se essa mudança produz uma configuração factível. Para obter isso através da matriz incidência, é preciso executar uma busca para reconstruir a nova matriz. Já o método que usa AG só produz configurações factíveis. Além disso, nenhuma busca é executada durante a reconstrução de qualquer matriz de cadeias.

## 6 Resultados Experimentais

O algoritmo proposto foi testado usando o sistema de distribuição relativamente grande da cidade de São Carlos, SP. Sua representação por cadeias de grafo é mostrada na Figura 4. Inicialmente foi exigido, do método que usa AG, minimizar o desbalanço entre os alimentadores (supõem-se que cargas equilibradas minimizem as sobrecargas dos equipamentos). Figure 5 mostra que o algoritmo genético atinge o desbalanço mínimo dos alimentadores em 1550 gerações (ao redor 3 segundos) para a configuração de sistema de Figura 4.

Na Figura 6, é mostrado o desempenho do al-

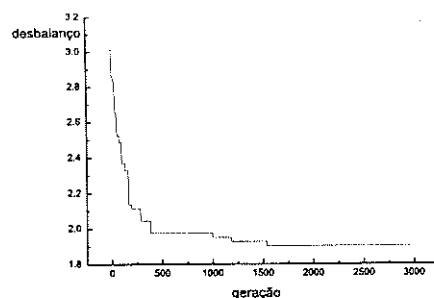


Figura 5. Desbalanço mínimo entre alimentadores do sistema de distribuição da Figura 4.

goritmo para alcançar a solução ótima quando o alimentador 100\* (com uma carga grande) está completamente desenergizado (veja Figura 4) e sua carga é totalmente transferida a um alimentador vizinho (uma configuração ótima é alcançada em 6500 gerações: ao redor 10 segundos). Finalmente, para este mesmo caso, exige-se também minimizar o número de manobras, a solução ótima é atingida em torno de 1600 gerações (38 segundos, veja a Figura 7). Essas experiências foram feitas em um Pentium100 com 32 MB de memória de RAM.

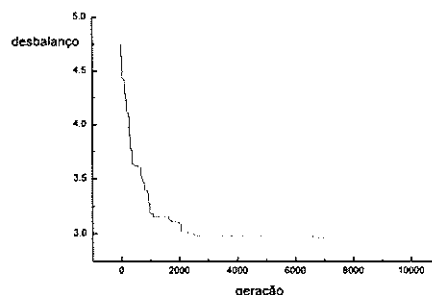


Figura 6. Minimal unbalance among feeders when feeder 100 is whole out-of-service.

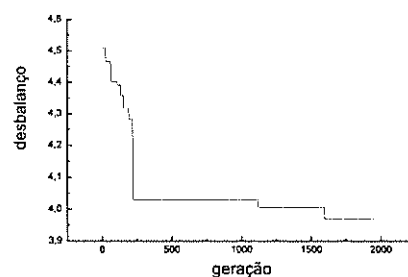


Figura 7. Minimal unbalance among feeders with minimal number of switching operations.

## 7 Conclusão

Neste trabalho, um método que usa AG para restabelecer energia em sistemas de distribuição após faltas permanentes foi apresentado. A mesma proposta também pode ser usada para obter planos para manutenção do sistema. Os métodos para restabelecimento de energia e para planejamento ótimo de sistema de distribuição até então desenvolvidos podem só lidar com otimizações locais. Para superar esse obstáculo, foi desenvolvido uma técnica baseada em AG para se obter um restabelecimento de energia ótimo. Tal técnica é capaz de realizar busca e otimização que inclua funções objetivo não lineares e não contínuas. Uma representação nova da configuração do sistema de distribuição por cadeias de grafo foi proposta. Isso permite ao Algoritmo Genético administrar sistemas de distribuição grandes, bem como grandes áreas desenergizadas.

Esta metodologia também pode tratar de múltiplas faltas. Múltiplas faltas significam várias áreas desenergizadas ao mesmo tempo. Neste caso, é só necessário executar o AG para otimizar a configuração nova da rede sem os setores que foram isolados.

## Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado em parte pelo CNPq e pela FAPESP.

## Referências Bibliográficas

- Aoki, K., Nara, K., Itoh, M., Satoh, T. e Kuwabara, H. (1989). A new algorithm for service restoration in distribution systems, *IEEE Trans on Power Delivery* 4, No. 3: 1832-1839.
- Castro, C. H., Bunch, J. B. e Topka, T. M. (1980). Generalized algorithms for distribution feeder deployment and sectionalizing, *IEEE Trans on PAS-99*, No.2: 549-557.
- Chen, J. L. e Hsu, Y. Y. (1989). An expert system for load allocation in distribution expansion planning, *IEEE Trans on Power Delivery* 4, No. 3: 1910-1918.
- Delbem, A. C. B. (1998). *Restabelecimento de Energia em Sistemas de Distribuição utilizando algoritmo com heurísticas "fuzzy"*, EESC-USP/Dissertação de mestrado.
- Delbem, A. C. B., Carvalho, A. C. P. L. F. e Bretas, N. G. (1997a). Energy restoration in distribution systems using search with fuzzy heuristics, *29<sup>th</sup> North American Power Symposium (NAPS), USA* pp. 295-300.
- Delbem, A. C. B., Carvalho, A. C. P. L. F. e Bretas, N. G. (1997b). Optimal energy restoration in distribution systems using genetic algorithms, *International Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications (ICCIMA'97), Australia* pp. 150-154.
- Delbem, A. C. B., Carvalho, A. C. P. L. F. e Bretas, N. G. (1998). Energy restoration in distribution systems using search with fuzzy heuristics, *Accepted in: International Journal of Engineering Intelligent Systems for Electrical Engineering and Communications*.
- Devi, V. S., Gupta, D. P. S. e Anandalingam, G. (1995). Optimal restoration of power supply in large distribution systems in developing countries, *IEEE Trans on Power Delivery* 10, No. 1: 430-437.
- Goldberg, D. E. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*, Addison-Wesley, Massachusetts.
- Hsu, Y. e Kuo, H. (1994). A heuristic based fuzzy reasoning approach for distribution system service restoration, *IEEE Trans on Power Delivery* 9, No.2: 948-953.
- Le, L. T. (1984). *Techniques of prolog programming*, John Wiley & Sons.
- Liu, C. C., Lee, S. J. e Venkata, S. S. (1988). An expert system operational aid for restoration and loss reduction of distribution systems, *IEEE Trans on Power Systems* 3, No. 2: 619-626.
- Morelato, A. L. e Monticelli, A. (1989). Heuristic search approach to distribution system restoration, *IEEE Trans on Power Delivery* 4, No. 4: 2235-2241.
- Wang, J., Chiang, H. e Darling, G. R. (1996). An efficient algorithm for real-time network reconfiguration in large scale unbalanced distribution system, *IEEE Trans on Power Systems* 11, No. 1: 511-517.
- Wilson, R. J. (1972). *Introduction to graph theory*, Oliver & Boyd.
- Winston, P. H. (1993). *Artificial Intelligence*, Addison-Wesley, Massachusetts.